

## ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE LA IGNIMBRITA GUACHA, COMPLEJO VOLCÁNICO ALTIPLANO PUNA, ANDES CENTRALES

Silvia Singer<sup>1\*</sup> y Rubén Somoza<sup>1,2</sup> Beatriz Coira<sup>2</sup> y Juan F. Vilas<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Depto. Cs Geológicas, Universidad de Buenos Aires.

<sup>2</sup> CONICET

### RESUMEN

Presentamos los resultados de un estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética realizado sobre la Ignimbrita Guacha en el Complejo Volcánico Altiplano - Puna en los Andes Centrales. Este trabajo permitió caracterizar la fábrica magnética de esta unidad e inferir las direcciones de transporte locales las cuales se reconciliaron con la probable fuente de emisión determinada en la región mediante estudios de geología regional y paleomagnetismos.

**Palabras clave:** Ignimbrita Guacha, fábrica magnética, caldera Guacha, Complejo Volcánico Altiplano Puna

### ABSTRACT

We present a study of anisotropy of magnetic susceptibility developed on the Guacha Ignimbrite from the Altiplano - Puna Volcanic Complex, in the Central Andes. The results allow us to characterize the magnetic fabric of this unit and to infer local transport directions in agreement with the source emission identified by regional geology and paleomagnetism.

**Keywords:** Guacha ignimbrite, magnetic fabric, Guacha Caldera, Puna Highland, Volcanic Complex

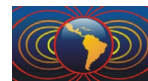
### Introducción

El Complejo Volcánico Altiplano- Puna (CVAP) (de Silva, 1989) (fig. 1) es un campo volcánico resultante



de un gran actividad (*flare up*) ignimbrítica durante el Cenozoico Tardío. El CVAP constituye una de las más grandes concentraciones de ignimbritas del mundo y la mayor en la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC). El complejo muestra registros volcánicos de 10 Ma a 1 Ma, los más antiguos están más distribuidos regionalmente, mientras que los registros más jóvenes tienden a concentrarse cerca de la ZVC. Los productos eyectados cubren un área de 70,000 km<sup>2</sup> localizados entre los 21° y 24° S, entre los cuales hay voluminosas ignimbritas asociadas a complejos caldéricos multicíclicos. Si bien se han reconocido centros eruptivos y se han propuesto mecanismos de colapso caldérico para algunas ignimbritas (Soler *et al.*, 2007), el conocimiento para otras unidades es aún escaso. La correlación de los afloramientos de

**Figura 1.** Mapa de la Zona Volcánica Central de los Andes. Se observa el Complejo Volcánico Altiplano Puna (CVAP) y ubicación de la Caldera Guacha (modificado de Lindsay *et al.*, 2001).



estas grandes ignimbritas es problemática debido a una serie de factores tales como (1) distribución inicial discontinua debido a los mecanismos de la erupción y/o controles topográficos sobre el emplazamiento; (2) discontinuidad de afloramientos debido a soterramiento y/o erosión; (3) variaciones verticales y horizontales de características intrínsecas de la ignimbritas tales como soldamiento, cristalización, tamaño de grano medio, selección, y zonación química. En la resolución de estas cuestiones, el paleomagnetismo y los estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética han probado ser herramientas muy útiles (Somoza *et al.*, 1996, 1999; Ort *et al.*, 2013).

El Complejo caldérico Cerro Guacha es una estructura volcano-tectónica policíclica del Mioceno tardío – Plioceno, ubicada en los Andes Centrales de Bolivia (Iriarte *et al.*, 2011). Edades radiométricas  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  (Salisbury *et al.*, 2011) y estudios paleomagnéticos (Somoza *et al.*, 1996; Ort *et al.*, 2013) sugieren que la Caldera Cerro Guacha fue formada por dos erupciones principales, colapso de caldera, ciclos de resurgencia y erupciones más pequeñas (Iriarte *et al.*, 2011). Dos ignimbritas principales ( $> 600 \text{ km}^3$ ) son definidas con edades  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  a partir de biotitas y sanidinas (Salisbury *et al.*, 2011): la Ignimbrita Guacha de  $5.65 \pm 0.01 \text{ Ma}$ , con un volumen de magma estimado en  $1300 \text{ km}^3$ ; y la Ignimbrita Tara de  $3.49 \pm 0.01 \text{ Ma}$  ( $800 \text{ km}^3$ ). La última erupción importante ocurrió en el flanco occidental produciendo la Ignimbrita Puripica Chico de  $1.72 \pm 0.02 \text{ Ma}$  y un volumen de  $\sim 10 \text{ km}^3$ .

En este trabajo presentamos los resultados de un estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) sobre la ignimbrita Guacha que permitió caracterizar las fábrica magnética de esta unidad, obtener direcciones locales de transporte de los flujos, localizar su fuente y confrontar estos resultados con los datos de campo

## La Ignimbrita Guacha

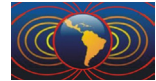
La ignimbrita Guacha es una riodacita rica en cristales (67-71 % peso  $\text{SiO}_2$ ) (Salisbury *et al.*, 2011) y con alto contenido de potasio. La observación al microscopio bajo luz transmitida y reflejada sobre muestras de esta ignimbrita aflorantes en las cercanías de la laguna Vilama indica que los minerales representativos son: biotita, como máfico dominante, cuarzo, plagioclasa, hornblenda y, como accesorios, magnetitas, zircón y apatito. También son frecuentes las trizas vítreas y los fragmentos pumíceos

## Estudios paleomagnéticos y de ASM previos

Los sitios muestreados de esta ignimbrita (J, NH, G y V) fueron erróneamente correlacionados con la Ignimbrita Atana por Somoza *et al.* (1996), mientras que Coira *et al.* (1996) la reconocieron como una unidad distinta a la que denominaron Ignimbrita Bonanza ( $\text{K}/\text{Ar}$   $6.2 \pm 0.5 \text{ Ma}$ ). Ort *et al.* (2013), realizan un estudio paleomagnético sobre la Ignimbrita Guacha y obtienen una magnetización remanente característica ( $D = 178.9$ ,  $I = 68.8$ ,  $\alpha_{95} = 9.0$ ,  $n = 6$ ), la cual es estadísticamente indistinguible de la MRC obtenida por Somoza *et al.* (1996) ( $D = 176.4$ ,  $I = 69.8$ ,  $\alpha_{95} = 5.7$ ,  $n = 4$ ). Ort *et al.* (2013) sospechan que las direcciones de la Ignimbrita Bonanza corresponden a la Ignimbrita Guacha. Ort *et al.* (2013), consideran los resultados propios adicionalmente a los de Somoza *et al.* (1996) y calculan una MRC de dirección  $D = 178.0$   $I = 69.2$ ,  $\alpha_{95} = 5.1$ ,  $n = 10$ . Esta similitud de resultados paleomagnéticos es consistente con la similar composición y firma espectral en imágenes que muestran las ignimbritas Guacha y Bonanza (Pablo Caffé, com. pers., 2011). Un estudio preliminar de ASM con el fin de estudiar las direcciones de transporte de estos flujos y su fuente fue presentado por Somoza *et al.* (1994). En este trabajo se estimó una procedencia desde el W - NW para los flujos de esta unidad.

## Mineralogía magnética

El estudio de las secciones pulidas muestra que el principal mineral opaco es titanomagnetita, el cual se encuentra como fenocristal en la matriz (aproximadamente granos de  $25 \mu$ ) y en los fragmentos pumíceos. Los fenocristales llegan a alcanzar los  $500 \mu$ . Presentan *lamellae* de ilmenita<sub>ss</sub>, producto de oxyexolución,



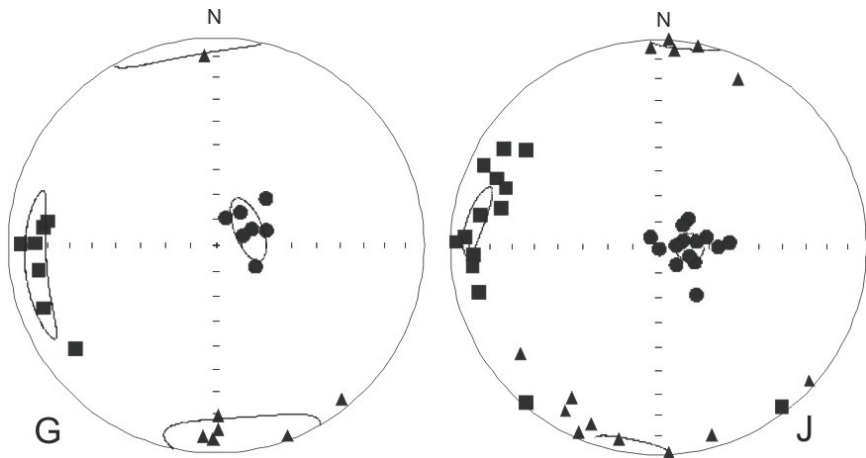
**Figura 2.** Grano de titanomagnetita perteneciente a la Ig. Guacha (sitio V). Se observan *lamellae* de ilmenita<sub>ss</sub> (más claras), concentradas a lo largo de fracturas, inclusiones silicáticas y en los bordes de los cristales. Luz reflejada, en aceite.

concentradas a lo largo de fracturas, inclusiones silicáticas y en los bordes de los cristales (fig. 2). El grado de oxidación de los cristales es homogéneo, independientemente de su tamaño. La alteración puede ser clasificada como estadio C3, según Haggerty (1991).

### Estudios de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética

Los sitios muestreados de la Ignimbrita Guacha fueron denominados V, G, J, B, NH y C2. Se obtuvieron entre 6 y 9 cilindros por cada sitio. Los resultados de las mediciones ASM se muestran en la Tabla 1 y en la Figura 3. Los parámetros de anisotropía definen elipsoides con importante desarrollo de la componente planar en todos los sitios ( $T > 0$ ,  $F > L$ ). El grado de anisotropía  $P$  es menor al 5%, las lineaciones magnéticas son  $< 2\%$ , mientras que las foliaciones están mejor desarrolladas. Una excepción, en cuanto a sus parámetros ASM, es el sitio C2 con valores  $P$  y  $F$  de aproximadamente del 20%, lo que posiblemente esté asociado al mayor grado de aplastamiento/soldamiento. La mayoría de los sitios muestran foliaciones magnéticas que inclinan en direcciones con una componente al oeste (fig. 4), con excepción del sitio NH, cuya foliación magnética buza hacia el NE.

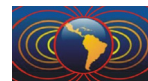
**Figura 3.** Proyección estereográfica en el hemisferio inferior de los ejes principales ASM y de sus elipses al 95% de confianza para los sitios G y J de la Ig. Guacha. Cuadrado: eje máximo de susceptibilidad, triángulo: eje intermedio, círculo: eje mínimo.



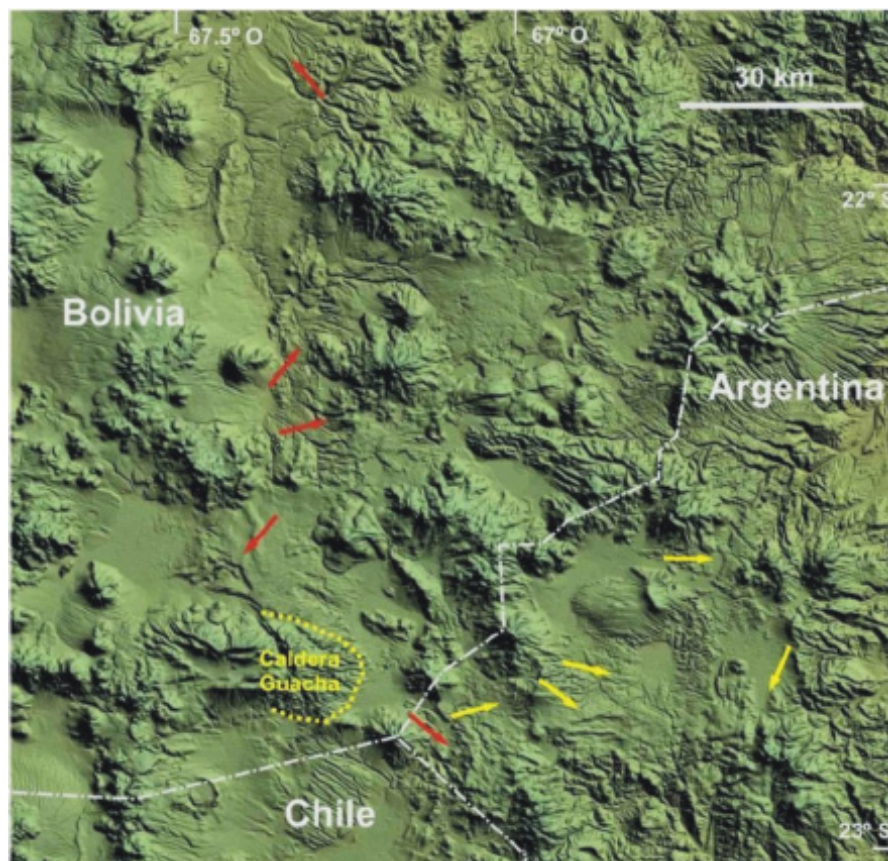
**Tabla 1.** Resultados, Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética

Sitio	n	Km (10 <sup>-3</sup> SI)	Parámetros ASM medios				Autovectores medios					
			L	F	P	T	K1		K2		K3	
							Dec/Inc	e/z	Dec/Inc	e/z	Dec/Inc	e/z
V	9	2.37	1.006	1.021	1.028	0.505	276/7	32/9	73/9	32/9	147/78	10/7
G	9	2.60	1.005	1.028	1.034	0.652	264/13	23/5	173/5	23/13	61/76	13/5
J	4	4.09	1.011	1.041	1.052	0.585	279/11	11/4	188/2	11/5	88/79	6/5
B	4	5.48	1.018	1.033	1.051	0.305	301/12	20/12	32/2	20/12	132/78	17/13
B	4	2.03	1.012	1.026	1.038	0.376	8/15	31/20	102/13	28/17	229/70	26/18
C2	5	1.34	1.015	1.190	1.208	0.841	306/25	20/10	200/32	20/9	67/48	12/8





K1, K2 and K3 son los eigenvectores medios del elipsoide de susceptibilidad magnética, los que representan las direcciones donde se registran las intensidades máximas, intermedias y mínimas de la susceptibilidad total de la muestra;  $n$  indica número de muestras (mediciones independientes en afloramiento) usadas para determinar los parámetros ASM de cada sitio;  $K_m = (K1+K2+K3)/3$  es la susceptibilidad magnética media (SI units);  $L$  es la lineación magnética ( $K1/K2$ );  $F$  es la foliación magnética ( $K2/K3$ );  $P$  es el grado de anisotropía ( $K1/K2$ );  $T = (\ln F - \ln L)/(\ln F + \ln L)$  es el parámetro de forma de Jelinek (1981); Dec/Inc indican las coordenadas esféricas del azimut del hundimiento de cada eje principal de susceptibilidad;  $e/z$  son los semiángulos de los ejes mayor y menor de la elipse de 95% de confianza alrededor de la dirección media correspondiente



**Figura 4.** Imagen topográfica mostrando los sitios muestreados de las Ig. Guacha y las direcciones locales de transporte (flechas amarillas), inferidas a partir de los ejes K3. Las flechas rojas son direcciones locales de transporte determinadas utilizando los datos de Ort *et al.* (2013). Las direcciones K3 de la Ig. Guacha son consistentes con flujos provenientes de la Caldera Guacha.

### Evaluación de las direcciones de transporte

En el caso de la Ignimbrita Guacha, la observación de sus parámetros ASM (Tabla 1) indica que sus fábricas magnéticas son planares. Sus ejes K1, que definen las lineaciones magnéticas, muestran parámetros estadísticos ( $e$ ) que indican una dispersión moderada a alta de los mismos, sin embargo la dirección de buzamiento de estos ejes, es hacia el oeste, en concordancia con las foliaciones. Por lo tanto, en este caso, el uso de lineaciones y de foliaciones magnéticas sería aceptable para determinar las direcciones locales de transporte. Una característica, no obstante, favorece a los ejes K3. La precisión en la definición de la dirección de K1 depende del muestreo. En efecto, el retiro aleatorio de un valor puede modificar la dirección de K1 hasta en unos  $15^\circ$ , cosa que no sucede cuando la simulación se realiza con el eje K3. Se prefiere, por lo tanto, el uso de las foliaciones magnéticas para la determinación de la dirección local de transporte. La Figura 4 muestra una imagen con las direcciones hacia donde se inclina el eje K3 (polos de las foliaciones magnéticas) en los sitios muestreados. Se observa que la mayoría de las foliaciones magnéticas (expresadas a través del eje K3) imbrican hacia la Caldera Guacha, es decir que el transporte local en la mayoría de



los sitios es de tipo radial hacia afuera de la caldera. Una excepción en este trabajo es el sitio NH, que imbrica hacia el NNE (transporte hacia el SSW). Es muy probable que este elipsoide refleje un control paleotopográfico, ya que la dirección de transporte es paralela a la posible plataforma determinada por los depósitos de la Ignimbrita Granada y rocas asociadas, que son más antiguas que la Ignimbrita Guacha y seguramente actuaron como barrera local para flujos provenientes del oeste. Una consideración que se desprende de esta especulación es que el bajo topográfico estaría hacia el sur de la depresión Vilama.

Los ejes K3 definen espacialmente un patrón de transporte que es consistente con un patrón de flujo radial probable inferido a partir de la Caldera Guacha, que es la estructura volcánica propuesta por Lindsay *et al.* (2001) (véase también Salisbury *et al.*, 2011; Ort *et al.*, 2013) como fuente emisora de la Ignimbrita Guacha. Finalmente, los resultados indican que el eje K<sub>3</sub> es un indicador del sentido de flujo confiable en este tipo de depósitos.

## Referencias

- Coira, B., Caffè, P., Mahlburg Kay, S., Diaz, A. y Ramirez, A., 1996. Complejo volcánico de Vilama - Sistema caldérico del Cenozoico superior en Puna, Jujuy. 13th Congreso Geológico Argentino, Actas Vol. 3, Buenos Aires, 603-620.
- Haggerty, S., 1991. Oxide-Textures. A Mini Atlas, in Lindsley, D. H., Ed., Oxide minerals; petrologic and magnetic significance. *Reviews in Mineralogy* 25, 129-219.
- Iriarte, R., de Silva, S. L.; Jimenez, N. y Ort, M. H., 2011. The Cerro Guacha Caldera complex: An Upper Miocene Pliocene polycyclic volcano-tectonic structure in the Altiplano Puna Volcanic Complex of the Central Andes of Bolivia, Abstract, Amer. Geophys. Union Fall Meeting, V21C-2510.
- Jelinek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics* 79, 63-67.
- Lindsay, J. M., de Silva, S., Trumbull, R., Emmermann, R. y Wemmer, K., 2001. La Pacana caldera, N. Chile: A re-evaluation of the stratigraphy and volcanology of one of the world's largest resurgent calderas: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 106, 145 -173.
- Ort, M. H., de Silva, S. L., Jiménez N., Jicha, B. R. y Singer, B. S., 2013. Correlation of ignimbrites using characteristic remanent magnetization and anisotropy of magnetic susceptibility, Central Andes, Bolivia. *Geophysics, Geochemistry and Geosystems*, 14 (1), doi:10.1029/2012GC004276
- Salisbury, M. J., Jicha, B. R., de Silva, S. L., Singer, B.S., Jiménez., N. y Ort M.H., 2011. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar chronostratigraphy of Altiplano-Puna Volcanic Complex ignimbrites reveals the development of a major silicic magmatic province, *Geol. Soc. Am. Bull.* 123, 821-840.
- Soler, M., Caffè, P., Coira B., Onoe, A. y Mahlburg Kay S., 2007. Geology of the Vilama caldera: A new interpretation of a large-scale explosive event in the Central Andean plateau during the Upper Miocene. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 164, 27-53.
- Somoza, R., Singer, S. Coira, B. Vilas, J., Diaz, J. y Caffè, P., 1994. Ignimbritas del Complejo Volcánico Vilama (22.6°S-67°O), correlaciones paleomagnéticas y petrológicas, in Actas 7° Congreso Geológico de Chile, vol. 1, 179-183.
- Somoza, R., Singer, S. y Coira B., 1996. Paleomagnetismo of upper Miocene ignimbrites at the Puna: An analysis of vertical-axis rotations in the Central Andes. *Journal of Geophysical Research* 101, 11.387-11.400.
- Somoza, R., Singer, S. y Coira B., 1996. Paleomagnetismo of upper Miocene ignimbrites at the Puna: An analysis of vertical-axis rotations in the Central Andes. *Journal of Geophysical Research* 101, 11.387-11.400.
- Somoza, R., Singer, S. y Tomlinson, A., 1999. Paleomagnetic study of upper Miocene rocks from northern Chile: Implications for the origin of late Miocene-Recent tectonic rotations in the southern Central Andes, *Journal of Geophysical Research* 104, B22923-B22936.